

# 海南岛及邻区地震精确定位及断裂构造分析\*

徐晓枫, 王惠琳, 陈小敏

(海南省地震局, 海南 海口 570203)

**摘要:** 利用双差地震定位法对 2000 ~ 2012 年海南岛及邻区  $M_L \geq 1.0$  的 1 035 次地震进行重新定位, 得到了 820 次地震的重定位结果。结果显示: 重新定位后的结果大大改善了原地震定位的精度, 且部分震群更加集中密集, 并向断裂带趋近; 震源深度分布更为合理, 精定位前震源深度绝大多数位于 10 km 处, 而精定位后发散分布于地下 20 km 内, 近似呈正态分布形态, 优势分布深度为 5 ~ 15 km; 重定位后的地震呈现垂直条带分布特征, 体现了断裂带的运动构造, 更加符合断裂带的地震活动特点。

**关键词:** 双差定位法; 海南岛及邻区; 震源深度; 地震构造; 地震活动

**中图分类号:** P315

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-0666(2014)02-0216-06

## 0 前言

双差定位算法是一种相对定位方法, 反演的是一组丛集地震中每个地震相对于该丛集地震矩心的相对位置。该方法的假设前提是一个地震丛集的所有地震不可能出现整体的位置偏差, 而这通常符合实际情况。它要求地震丛集中的每两个事件间的距离远小于到观测它们的台站距离, 因此双差定位法能够有效减少由于对地壳速度结构了解的不够精确所带来的误差, 是最为精确的地震定位方法之一 (Waldhauser, Ellsworth, 2000; Bogdan *et al*, 2005)。Waldhauser 和 Ellsworth (2000) 详细解释了双差定位原理, 并进行了精确定位应用, 揭示了小震活动性与 Hayward 断层的关系。国内学者也利用该方法做了很多富有成效的研究工作, 杨智娴等 (2003) 对我国中西部地区 1992 ~ 1999 年的 10 057 次地震进行了双差定位, 得到了 6 496 个地震新的震源参数。黄媛等 (2006) 对 2003 年新疆巴楚—伽师地震序列用双差法重新定位。Zheng 等 (2009) 先采用 Geiger 法确定主震和余震序列的绝对震源位置, 再利用双差定位对地震序列进行相对定位。宋美琴等 (2012) 在不同区域采用不同的速度模型用绝对定位方法和双差相对定位方法对山西及其周边地区中小地震进行了精确重新定位。

我国东南沿海地区的地震主要分布于沿海地区, 北起福建北部, 南至雷琼和桂东南地区, 形成一条大体上与海岸线平行的相对狭长的地震发生带, 即东南沿海地震带。本文研究区域 ( $17.0^\circ \sim 22.5^\circ \text{N}$ ,  $107.0^\circ \sim 114.5^\circ \text{E}$ ) 就位于东南沿海地震带的西南端, 即海南岛及邻区。目前, 海南岛及邻区地震台站分布较为密集, 自 2000 年有数字地震记录以来, 已积累了丰富的数字化地震资料, 但由于岛的四周是海域而无法架设地震台站, 对海域地震定位造成少许的偏差。北部湾、南海海域内的地震定位残差大多在 0.5 s 以内, 大于 0.5 s 的结果工作人员会重新定位计算。为了研究海南岛及邻区的地震活动构造和地震分布特征, 采用双差定位法对海南省地震台网自有数字地震资料以来 (2000 ~ 2012 年)  $M_L \geq 1.0$  地震进行重新定位, 新的研究结果可为海南岛及邻区的地震构造特征和分布活动特征提供可靠依据。

## 1 双差定位法原理

根据射线理论, 从地震  $i$  到台站  $k$  的地震波到时  $T$  可以表示为沿射线路径的积分:

$$T_k^i = \tau^i + \int_i^k u ds. \quad (1)$$

其中,  $\tau$  是事件  $i$  的发震时刻,  $u$  是经过路径的慢

\* 收稿日期: 2013-06-07.

基金项目: 地震科技星火计划项目“海南岛及邻区地壳 S 波 Q 值成像研究”(XH12037Y) 资助。

度,  $ds$  是路径微分。由于地震走时和震源位置的非线性关系, 使用截断 Taylor 级数展开将式 (1) 线性化 (Geiger, 1910)。由此使得事件  $i$  的走时残差  $r$  与在各观测点  $k$  的当前 4 个震源参数扰动量  $\Delta m$  之间线性相关, 可表示为

$$\frac{\partial t_k^i}{\partial m} \Delta m^i = r_k^i. \quad (2)$$

其中,  $\Delta m^i = (\Delta x^i, \Delta y^i, \Delta z^i, \Delta \tau^i)$ ,  $r_k^i = (t_k^{\text{obs}} - t_k^{\text{cal}})^i$ ,  $t_k^{\text{obs}}$  和  $t_k^{\text{cal}}$  分别为观测走时和理论走时。方程 (2) 适用于读取观测到时, 通过选取一对事件  $i$  和  $j$  关于式 (2) 的差, 得到关于一对事件的表述方法:

$$\frac{\partial t_k^{ij}}{\partial m} \Delta m^{ij} = dr_k^{ij}, \quad (3)$$

其中,  $\Delta m^{ij} = (\Delta dx^{ij}, \Delta dy^{ij}, \Delta dz^{ij}, \Delta d\tau^{ij})$  是两个事件的相对震源参数的改变量。 $dr_k^{ij}$  为两个地震之间观测和计算走时差的残差, (3) 式又可以写为

$$dr_k^{ij} = (t_k^i - t_k^j)^{\text{obs}} - (t_k^i - t_k^j)^{\text{cal}}. \quad (4)$$

这即为双重残差的定义, 计算双差既可以用台站观测得到的观测走时, 又可以使用波形互相关得到的相对走时差。

## 2 数据资料

### 2.1 台站情况

海南数字地震台网 2000 年开始运行, 初期仅记录海南岛内运行台站的地震数据, 2008 年开始将广西和广东台网的部分台站数据纳入海南地震台网中心记录。如图 1 所示, 目前海南地震台网中心共收集记录 35 个数字地震台的地震波形, 其中海南岛 21 个台站, 广东 8 个台站, 广西 6 个台站, 覆盖了雷州半岛和海南岛地区。

### 2.2 速度模型和资料

本文选用海南省地震台网中心自有数字地震资料以来 (2000 ~ 2012 年) 共 1 035 个  $M_L \geq 1.0$  地震进行重新精定位研究, 研究区域范围为雷琼

地区 ( $17^\circ \sim 22.5^\circ \text{N}$ ,  $107^\circ \sim 114.5^\circ \text{E}$ )。

为了选取精确的地壳 P 波波速模型, 给双差精定位时提供合理可靠的地壳波速模型, 选用了海南岛及邻区高质量的地壳波速勘探结果<sup>①②</sup>, 整理之后的波速分层模型见表 1。海南岛地下 Moho 界面深度约为 25 km, P 波和 S 波波速比为 1.73。

Waldhauser 和 Ellsworth (2000) 的双差定位程序需要先对输入文件进行预处理, 把地震事件组成事件对, 然后由震相对的走时对地震进行重新定位 (郑钰, 杨建思, 2008)。本文使用震相数据 13 223 条, 选用共轭梯度法来进行求解。由于 Pg、Sg 波到时精度不同, Sg 波的到时选取主观因素更大一些, 所以根据到时精度不同设置 P 波权值为 1, S 波权值为 0.5。

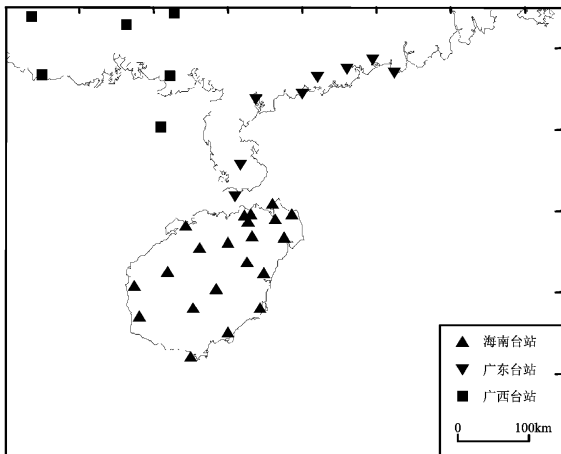


图 1 地震台站分布图

Fig. 1 Distribution of seismic stations

表 1 地壳 P 波波速分层模型

Tab. 1 Crustal P wave velocity layer model

P 波波速/ $\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$	下界面深度/km
4.00	2
5.80	4
6.00	6
6.10	8
6.20	10
6.30	15
6.40	20
6.50	25
8.00	33

① 中国地震局地球物理勘探中心. 2006. 海口市活断层探测与地震危险性评价高分辨地震折射和宽角折射探测.

② 中国地震局地球物理勘探中心. 2005. 海南 84 工程深地震测深资料处理解释报告.

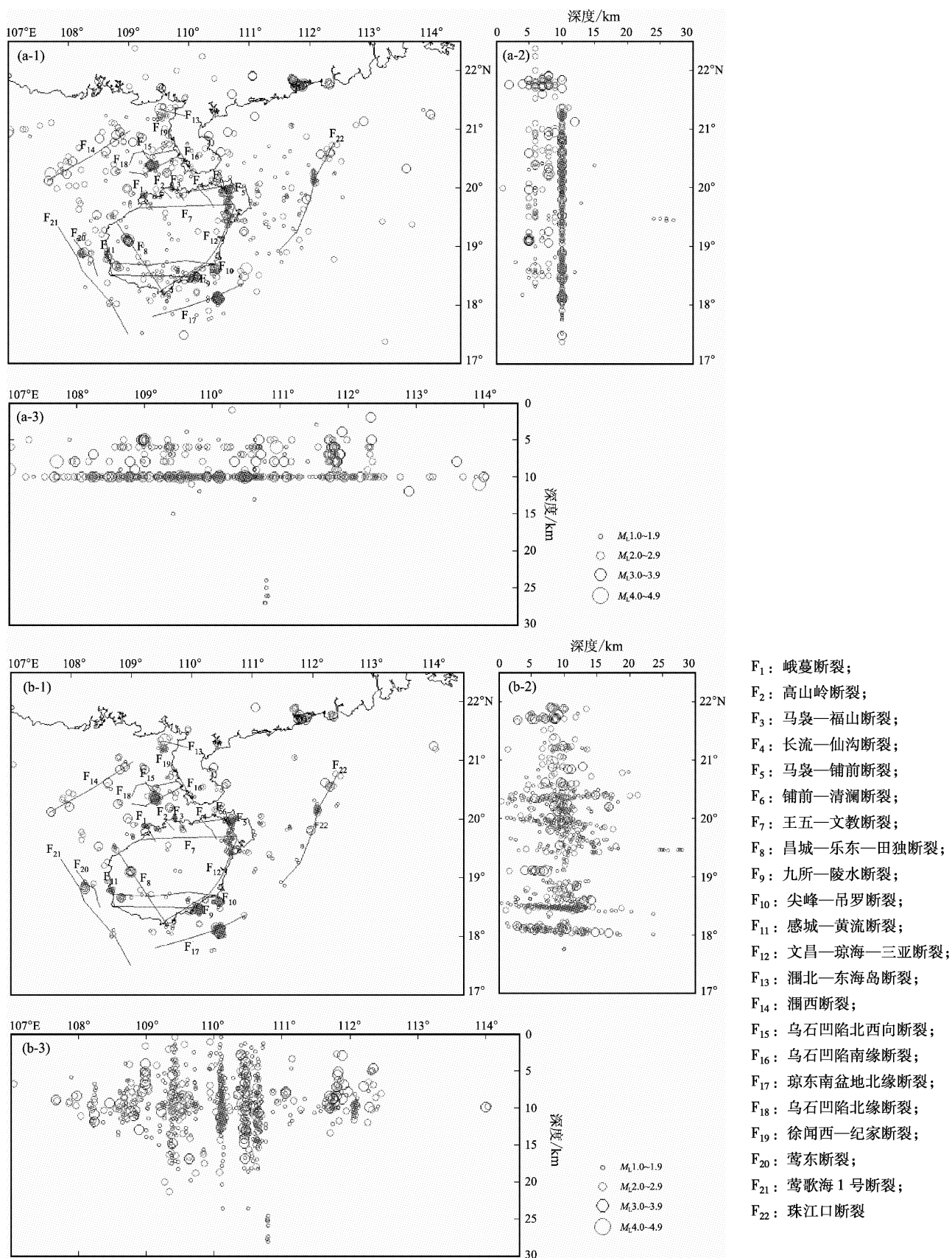


图2 重新定位前 (a)、重新定位后 (b) 地震震中分布图及深度剖面图

Fig. 2 Epicenter distribution and focal depth profile diagrams before (a) and after (b) relocating

### 3 结果及分析

#### 3.1 震中分布特征

为了更好地体现出震源深度与地表震中分布对应的关系,本文采用震中分布图与深度剖面图的经纬度相互对应方法,对比定位前后深度剖面上的震源分布特点。从图2中可以看出深度分布变化明显,重定位后的震源位置更加合理,深度剖面图和地表震中分布图中的小震群对应明显,呈垂直条带分布。

#### 3.2 震源深度分布特征

从震源深度来看,重定位前后的震源位置显示出很大差异,重新定位前地震震源深度大多集中在10 km,无法得出精确的震源深度,这是传统绝对定位方法普遍存在的问题(图2a)。重新定位后,所有的地震重新给出了震源深度,震源深度分布呈现出离散化特点(图2b),并呈垂直条带分布,体现了断裂带的运动构造更加符合断裂带的地震活动特点。

为了更清楚地看出地震的震源深度分布,以1 km为统计间隔对不同震源深度的地震频次进行了定量统计,给出深度—频度统计直方图(图3)。重新定位前,地震深度主要集中在10 km,地震数目达到864次,占总地震数目的84%,而其它深度没有明显的地震分布(图3a)。重新定位后,震源深度分布更为合理,地震深度不局限于10 km处,地下25 km以内地震呈发散分布,且近似成正态分布形态(图3b),显然更符合实际情况。目前地震台网的台站数量在逐年增加,可使用多台波形资料来确定地震震中,使定位地震震中变得逐渐精确,双差定位法用来确定震群震中和震源深度的分布是其最大优势。

#### 3.3 误差分析

通过双差法对海南岛及邻区(2000~2012年)1 035个 $M_L \geq 1.0$ 地震进行了重新定位,实际得到820个地震的精确定位参数,占原始数据比例的79%,其原因为部分地震构建不了成对的地震事件,或者相同台站的地震记录对共同的震相小于最小观测数。地震震源位置的平均测定误差(2倍标准偏差)在EW方向为2.05 km,在NS方向为2.15 km,在垂直方向为2.02 km。重新定位后,

全部地震的平均均方根残差为0.2 s,具体分布统计见图4。

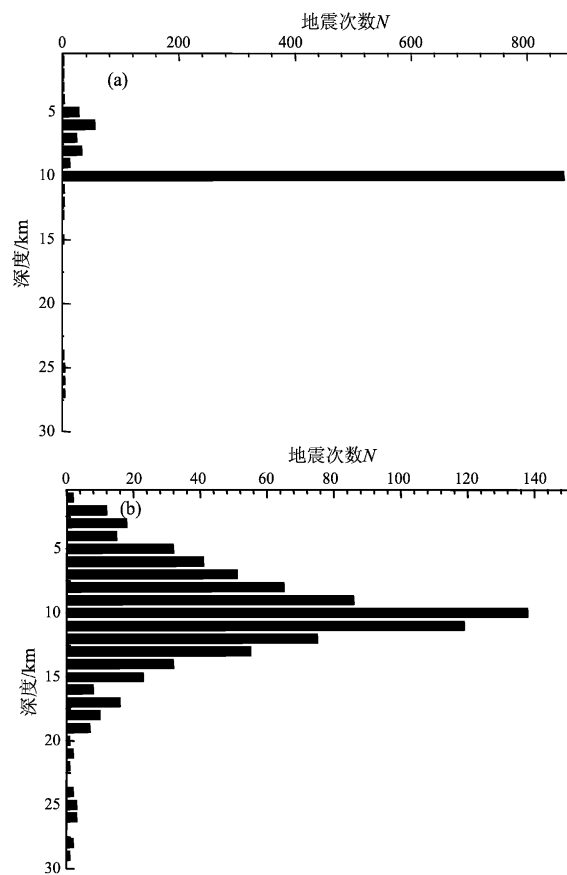


图3 重新定位前(a)、重新定位后(b)震源深度分布统计

Fig. 3 Focal depth distribution statistics before (a) and after (b) relocating

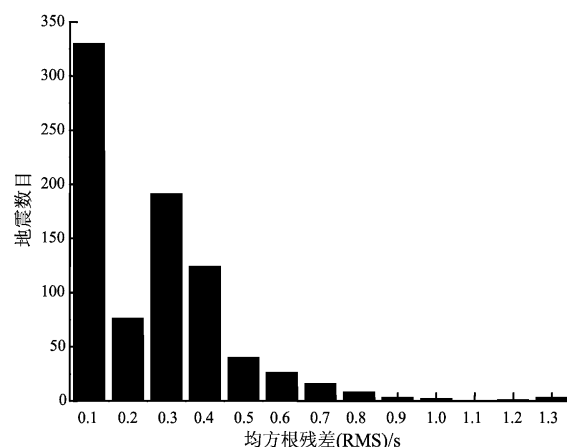


图4 重新定位后均方根残差分布直方图

Fig. 4 Histogram of the RMS residual distribution after relocating

### 3.4 地震分布和断裂构造分析

本文采用了最新的断裂带分布资料<sup>①</sup>,如图2所示,地震重新定位后,沿断裂带附近的小震分布更加密集,可以看出地震活动与断裂带的分布有一定的相关性。

(1) 从图2中可以看出深度分布变化十分明显,重定位后的震源位置分布体现出断裂带深部特征,深度剖面图和地表震中分布图中的小震群对应明显,呈垂直条带分布,如北部湾小震群( $F_{15}$ 、 $F_{16}$  断裂带交叉处),九所—陵水断裂带( $F_9$ )东端小震群,铺前—清澜断裂带( $F_6$ )和万宁近海小震群( $F_{17}$ ) 在深度剖面上都呈现出小震垂直分布形态,刻画出断裂带的特征。

(2) 重定位后铺前—清澜断裂( $F_6$ )周围的小震分布更加密集,并接近断裂带。铺前—清澜断裂带是全新世活动断裂,曾在1605年发生过7½级地震,多年来此断裂附近小震活动频繁。该断裂活动大致可分两段。北段控制东寨港地堑式断陷的形成,断裂以东全新世海湾砂层现今高出海平面10 m以上。南端活动较弱,大面积上更新统分布,从图2中可以看出,断裂南端的小震活动已经偏移至西几公里,并没有和断裂带重叠,有可能说明铺前—清澜断裂( $F_6$ )的西端有隐伏断裂的存在。

(3) 九所—陵水断裂( $F_9$ )地震都发生在断裂的东端,重定位前的地震分布不够集中,是由于在震相报告中人工读取震相时产生的错误,新的结果已对震相参数进行了修正。该断裂带地震时有发生,海蚀地貌发育,在断裂东端有热泉分布,都是与该断裂带东端的地震活动有关。

(4) 峨蔓断裂( $F_1$ )和马袅—福山断裂( $F_3$ )是晚更新世活动断裂。峨蔓断裂是一条控制火山活动的断裂。在峨蔓一带,控制一系列火山口北西向展布。沿该断裂带在地表曾经发现一些规模较小的北西向断层。重定位的结果显示,近年来的活动集中在断层的北段。马袅—福山断裂是从北部湾海底向东南延伸至海南岛琼北陆上地区,1994和1995年在马袅—福山断裂的西北延伸海域相继发生M6.1和M6.2地震,重定位的结果显示地震和断裂带的位置一致。

(5) 感城—黄流断裂( $F_{11}$ )是中更新世活动断裂,为一条推测的隐伏断裂。尖峰—吊罗断裂( $F_{10}$ )是前第四纪断裂,该断裂带在航磁和重力异常上有明显的反映。两条断裂的交叉处小震密集。

(6) 重定位后珠江口盆地、北部湾海域、琼东南沿海小震分布更加密集,与海域断裂带的构造特征比较一致。

## 4 结论

(1) 采用双差定位方法对海南岛及邻区(2000~2012年)共1 035个 $M_L \geq 1.0$ 地震进行重新定位,实际得到820个地震的精确定位参数,占原始数据比例的79%。定位前后震中的水平分布变化较为明显,定位后地震多呈丛集分布,提高了地震震中精确度。

(2) 地震震源深度分布的特点表明,海南岛及邻区地震主要发生在上地壳。相比原始定位记录,重定位后的震源深度分布呈现出离散化、正态分布的形态,而不是仅仅局限于10 km处,深度分布主要集中在地下25 km以内,这是由于地壳模型的改进和双差算法的优越性,使得定位结果更加接近地壳内部地震活动特性。

(3) 重新定位后改善了原地震定位的精度,地震在空间上分布更加集中在断裂带附近,结果更加合理。地震活动与断裂构造活动明显相关。重定位后深度分布变化明显,震源位置更加合理,深度剖面图和地表震中分布图中的小震群对应明显,呈垂直条带分布,刻画出断裂带的特征。

### 参考文献:

- 黄媛,杨建思,张天中. 2006. 2003年新疆巴楚—伽师地震序列的双差法重新定位研究[J]. 地球物理报,49(1):162-169.
- 宋美琴,郑勇,葛荣,等. 2012. 山西地震带中小震精确位置及其显示的山西地震构造特征[J]. 地球物理学报,55(2):513-525.
- 杨智娴,陈运泰,郑月军,等. 2003. 双差地震定位法在我国中西部地区地震精确定位中的应用[J]. 中国科学地球科学,33(S1):129-134.
- 郑钰,杨建思. 2008. 双差算法的剖析及参数对定位的影响[J]. 地震地磁观测与研究,29(3):85-93.

① 海南省海洋地震与工程地震研究中心. 2012. 100万吨/年乙烯及炼油改扩建工程场地地震安全性评价报告.

- Bogdan E., James M., Shiro O. . 2005. Double-difference relocations of the 2004 off the Kii peninsula earthquake [J]. *Earth Planets and Space*, 57(4):357–362.
- Geiger L. . 1910. Probability method for the determination of earthquake epicenters from arrival time only [J]. *Bull. St. Louis. Univ.*, 8(1):60–71.
- Waldhauser F., Ellsworth W. L. . 2000a. A double-difference earthquake location algorithm; method and application to the Northern Hayward Fault, California [J]. *Bull. Seism. Soc. Am*, 90(6):1353–1368.
- Zheng Y., Ma H. S., Lu J., *et al.* 2009. Source mechanism of strong after-shocks ( $M_s \geq 5.6$ ) of the 2008/05/12 Wenchuan earthquake and the implication for seismotectonics [J]. *Sci. China Ser. D-Earth Sci.*, 52(6):739–753.

## Analysis on Accurate Location of Earthquakes and Fault Structure in Hainan Island and its Adjacent Areas

XU Xiao-feng, WANG Hui-lin, CHEN Xiao-min

(*Earthquake Administration of Hainan Province, Haikou 570203, Hainan, China*)

### Abstract

Using the double difference location method, the 1 035  $M_L \geq 1.0$  earthquakes from 2000 to 2012 was relocated, and the relocation results of 820 earthquakes was obtained in Hainan Island and its adjacent area. The results showed that the location accuracy of the original earthquake had improved, and the epicenters of part of earthquake swarm distributed in cluster zone, which were approaching to the fault zone after relocation. The distribution of the focal depth was more reasonable. Before the accurate-positioning, the focal depths mainly distributed at 10 km. However, the focal depths divergently distributed within underground 20 km which was similar to normal distribution, and the advantage distribution depth is 5 ~ 15 km after the accurate-positioning. The distribution characteristic of the relocated earthquakes showed the characteristic of vertical belt, which reflected the tectonic movement of the fault and was close to seismic activity characteristic of the fault.

**Key words:** double difference location method; Hainan island and its adjacent areas; focal depth; seismic structure; seismic activity